

НАГРЕВ МНОГОПОЛОСНЫХ ШИНОПРОВОДОВ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н.,
инженеры ГЕРАСИМОВИЧ Д. А., НОСАЙРАТ ФАИЗ

Белорусская государственная политехническая академия

При коротких замыканиях токи в элементах электроустановок многократно превышают токи нормальных режимов. Их действие, несмотря на кратковременность, приводит к дополнительному нагреву проводников, температура которых может достигать больших и даже опасных значений.

В практических расчетах нагрева используются типовые кривые для определения температуры проводников по величине получаемого ими термического импульса [1]. Они построены при приближенном учете изменения теплофизических параметров проводников и без учета явлений поверхностного эффекта и эффекта близости. Для учета последних предлагается использовать коэффициент добавочных потерь нормального режима [1]. Однако, как показано в [2, 3], коэффициент добавочных потерь в переходном режиме является функцией времени. Кроме того, по мере нагрева проводников их электрические проводимости уменьшаются, что должно вызывать выравнивание распределения тока и уменьшение коэффициента добавочных потерь. Таким образом, отмеченные подходы к расчету нагрева весьма упрощенно учитывают (или не учитывают вовсе) протекающие в проводниках электромагнитные и тепловые процессы. Более полный их учет возможен при использовании в расчетах распределения параметров переходного электромагнитного поля. Ниже рассматривается такой расчет применительно к многополосным шинопроводам (уединенная прямоугольная шина, двух-, трехполосный и полый пакеты) (рис. 1а).

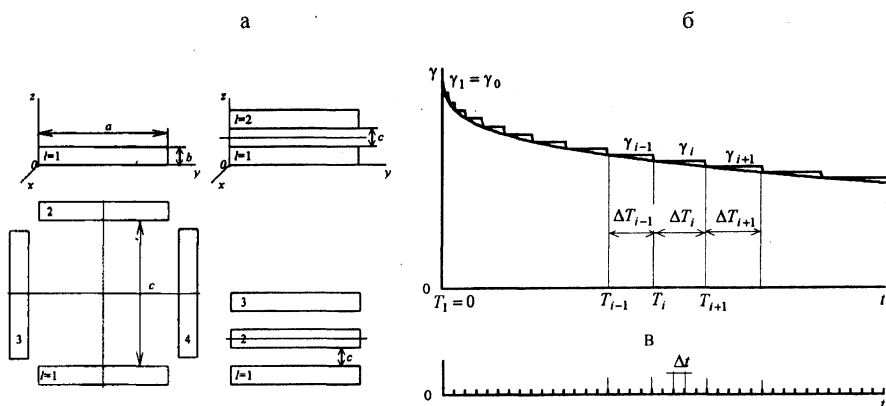


Рис. 1. Многополосные шинопроводы (а), аппроксимация зависимости $\gamma(t)$ ступенчатой кривой (б) и разбиение временного интервала (в)

Расчет распределения плотности тока с учетом изменения проводимости полос в переходном режиме. Нагревание проводников вызвано выделением в них джоулевых потерь от протекания тока. Удельная мощ-

ность потерь в любой момент времени пропорциональна квадрату плотности тока. Поэтому для определения величины мощности выделяемой тепловой энергии требуется знать токораспределение переходного режима в сечении полос шинпровода.

Распределение плотности тока в сечении l -й полосы пакета удовлетворяет уравнению [3]

$$\frac{\partial^2 \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial z^2} - \gamma(\Theta) \mu \frac{\partial \sigma_{lx}(y, z, t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $\gamma(\Theta)$ – известная зависимость удельной электрической проводимости от температуры Θ ;

μ – магнитная проницаемость проводников (алюминий, медь);
 $l = 1, 2, \dots, m$ (m – число полос в шинпроводе).

В [2, 3] решения этого уравнения получены при неизменных электромагнитных свойствах материала полос. Увеличение температуры в режиме короткого замыкания вызывает заметное уменьшение электрической проводимости, и при исследовании нагрева неучет этой зависимости может привести к некорректным результатам [4].

Как следует из (1), распределение плотности тока зависит от температуры. В общем случае температура является как функцией времени, так и пространственных координат [4]. Учет последнего фактора требует полного расчета теплового поля в сечении шинпровода, что многократно усложняет задачу исследования. Однако при расчете нагрева в подобных случаях принимают допущение о равномерном распределении температуры в полосах [1, 4], и в дальнейшем под температурой проводника понимается ее некоторое усредненное по сечению значение Θ .

Электрическая проводимость также становится функцией времени, т. е. $\gamma(\Theta) = \gamma(\Theta(t)) = \gamma(t)$. Зависимость $\gamma(t)$ в отличие от $\gamma(\Theta)$ неизвестна и может быть определена лишь в результате расчета нагрева (совместного решения (1) и уравнения теплового баланса). Аналитическое решение (1) не представляется возможным даже при известной зависимости $\gamma(t)$, так как оно становится уравнением в частных производных с переменными коэффициентами. Поэтому здесь используется численно-аналитический подход к его решению. На данном этапе зависимость $\gamma(t)$ полагается известной и заменяется ступенчатой кривой с неизменными значениями проводимости на каждой ступени (рис. 1б). На временном интервале ΔT_i проводимость γ_i должна отличаться от ее действительного значения несущественно, т. е. удовлетворять условию

$$\frac{\gamma(t) - \gamma(T_i)}{\gamma(T_i)} = \frac{\gamma(t) - \gamma_i}{\gamma_i} = \frac{\Delta\gamma(t)}{\gamma_i} \leq \varepsilon_\gamma, \quad t \in [T_i; T_i + \Delta T_i]; \quad i = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $\Delta\gamma(t)$ – отличие между значениями проводимости на ступени;

ε_γ – достаточно малая величина, определяющая скачок проводимости $\Delta\gamma_i = \gamma_i - \gamma_{i+1}$ в момент времени T_{i+1} .

Проводимость γ_i на интервале ΔT_i не зависит от времени, и для (1) на каждом временном интервале применимы решения аналогичных уравнений, полученные в [2, 3]. При известном токе переходного режима $i_\Sigma(t)$ в пакете плотность тока на i -м временном интервале представляется суммой вынужденных и свободных составляющих [3]

$$\sigma_{lxi}(y, z, t) = \sigma_{lxi\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t) + \sigma_{lxi\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t), \quad t \in [T_i; T_i + \Delta T_i], \quad (3)$$

где $\sigma_{lxi\Sigma}^{\text{вын}}(y, z, t)$ – мгновенные значения вынужденных составляющих плотности тока в l -й полосе пакета (индекс Σ указывает, что они находятся от полного тока переходного режима $i_\Sigma(t)$ [3]);

$\sigma_{lxi\Sigma}^{\text{св}}(y, z, t)$ – то же свободных составляющих плотности тока в l -й полосе пакета;

i – индекс временного интервала.

Распределение вынужденных составляющих по сечению полос находится итерационным методом в соответствии с результатами [2, 3] при текущем значении проводимости γ_i на интервале времени ΔT_i .

Начальные значения свободных составляющих определяются непрерывностью плотности тока для моментов времени $t = 0, T_1, T_2, \dots$ (рис. 16). Для i -го интервала начальные величины свободных составляющих находятся по распределениям полной плотности тока на интервале ΔT_{i-1} и вынужденной плотности тока на интервале ΔT_i для момента времени $t = T_i$. Дальнейший расчет свободных составляющих осуществляется так же, как в [2, 3] при проводимости γ_i .

Расчет распределения плотности тока на каждом временном интервале выполняется при известных величинах полного тока переходного режима в пакете и полосах. Для уединенной шины и симметричных (двухполосный и полый) пакетов их нахождение не представляет трудностей [3]. Расчет токов полос усложняется для трехполосных пакетов. Ток переходного режима в них распределяется между полосами неравномерно. В этом случае на каждом интервале ΔT_i необходимо рассчитать значения периодических и периодических затухающих токов каждой полосы в соответствии с результатами [3]. После этого из условия непрерывности токов полос находятся начальное значение и закон изменения аperiodического тока l -й полосы на i -м интервале.

Приведенные результаты дают возможность последовательно для $\Delta T_1, \Delta T_2$ и т. д. определять распределение плотности тока в многополосных шинопроводах с учетом изменения проводимости в переходном режиме. Мгновенные значения плотности тока при этом непрерывны во времени, несмотря на принятые разрывы в проводимости. Для нахождения зависимости $\gamma(t)$ и непосредственного расчета нагрева необходимо совместное рассмотрение (1), (3) и уравнения теплового баланса.

Расчет нагрева шинопроводов в переходном режиме на основе совместного решения уравнений электромагнитного поля и теплового баланса. Нагрев проводников при коротких замыканиях принято считать

адиабатическим, так как из-за кратковременности переходного режима теплоотдача не успевает вступить в действие. Уравнение теплового баланса при принятом допущении о равномерном распределении температуры по сечению полосы можно привести к виду [1]

$$dA_{кз} = c(\Theta)\gamma(\Theta)\rho d\Theta, \quad (4)$$

где $dA_{кз}$ – приращение термического импульса короткого замыкания l -й полосы за время dt [1] (индекс номера полосы l для тепловых параметров $A_{кз}$, Θ и пр. опускается);

$c(\Theta)$ – известная зависимость удельной теплоемкости материала полос от температуры;

ρ – плотность материала полос.

Зависимости удельных проводимости и теплоемкости проводников от температуры принимаются в соответствии с [1, 4].

Приращение термического импульса находится по рассчитанным мгновенным значениям плотности тока σ_{lxi}

$$dA_{кз} = \frac{1}{ab} \int_{D_l} (\sigma_{lxi}(y, z, t))^2 ds dt, \quad t \in [T_i; T_i + \Delta T_i], \quad (5)$$

где D_l – область сечения l -й полосы.

Расчет нагрева в допущении равномерного распределения плотности тока, т. е. так, как принимают при построении типовых кривых, можно осуществить интегрированием (4). Для приближенного учета явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в (4) вводится коэффициент добавочных потерь нормального режима $K_{дв}$. При использовании таких допущений интегрирование правой и левой частей (4) осуществляется раздельно. При учете реального распределения плотности тока в переходном режиме раздельное интегрирование невозможно, так как $\sigma_{lxi}(y, z, t)$, а значит, и левая часть (4) зависит от температуры. Характер токораспределения зависит от тока переходного режима [2, 3]. В силу отмеченных факторов связь между термическим импульсом и температурой становится неоднозначной.

Решение (4) можно осуществить численно, что подразумевает его интегрирование за время существования режима короткого замыкания $T_{кз}$. Для этого дополнительно к принятым временным интервалам ΔT_i рассматриваемый промежуток времени разбивается на интервалы с шагом Δt (рис. 1в). После замены дифференциалов в (4), (5) соответствующими конечными приращениями можно записать приближенные выражения для термического импульса, температуры и их приращений:

$$A_{кз}(t + \Delta t) = A_{кз}(t) + \Delta A_{кз}(t); \quad \Delta A_{кз}(t) = \frac{1}{ab} \int_{D_l} (\sigma_{lxi}(y, z, t))^2 ds \Delta t; \quad (6)$$

$$\Theta(t + \Delta t) = \Theta(t) + \Delta \Theta(t); \quad \Delta \Theta(t) = \Delta A_{кз}(t) / (\rho c(\Theta(t))\gamma(\Theta(t))). \quad (7)$$

Выражения (6), (7) дополняются известными начальными значениями параметров для момента времени $t = 0$: $\Theta(0)$; $A_{кз}(0) = 0$.

Таким образом, на основе (3), (6), (7) и результатов расчета переходного токораспределения осуществляется совместное решение уравнений электромагнитного поля и теплового баланса. Первоначально выполняются расчеты распределений вынужденных, свободных и полных плотностей тока для $t = 0$ при $\gamma_i = \gamma_0$, а также термического импульса, температуры и их приращений для $t = \Delta t$. Затем пересчитываются значения проводимости и теплоемкости для нового значения температуры. Аналогичные расчеты повторяются для $t = 2\Delta t$, $3\Delta t$, При этом контролируется условие (2) по невязке проводимости. Как только (2) перестает выполняться, расчет для интервала времени ΔT_1 с γ_1 считается законченным. После этого пересчитываются распределения плотностей тока с новым значением проводимости γ_2 . Дальнейший расчет на интервале ΔT_2 и последующих ΔT_3 , ΔT_4 и т. д. аналогичен предыдущему. Расчет нагрева считается выполненным при $t = T_{кз}$, и в результате формируются зависимости $A_{кз}(t)$, $\Theta(t)$, $\gamma(t)$, $c(t)$, $K_d(t)$ и др.

В рассмотренном алгоритме коэффициент добавочных потерь $K_d(t)$ является вспомогательной величиной. Его зависимость от времени позволяет установить допустимость учета явлений поверхностного эффекта и эффекта близости с помощью коэффициента добавочных потерь нормального режима.

Расчетный ток короткого замыкания при исследовании нагрева. Для расчета нагрева требуется знать протекающий по шинопроводу ток короткого замыкания. Величина и характер изменения во времени этого тока определяются источниками питания и параметрами цепи, в которой он протекает. В общем случае ток переходного режима представляется в виде [2, 3]

$$i_{\Sigma}(t) = \sum_{j=1}^n I_{mj} e^{-t/T_j} \sin(\omega_j t + \varphi_{0j}), \quad (8)$$

где I_{mj} , T_j , ω_j , φ_{0j} – амплитуда, постоянная времени затухания, частота и начальная фаза j -й составляющей тока переходного режима;

n – число составляющих в токе $i_{\Sigma}(t)$.

Нагрев проводников определяется длительностью существования режима короткого замыкания, которая может составлять от десятых долей до нескольких секунд. В таких случаях необходимо учитывать реальный характер изменения тока в течение всего переходного режима, т. е. в (8) должны войти все составляющие тока короткого замыкания (сверхпереходная, переходная, периодическая установившаяся, аperiodическая и ток от действия автоматического регулирования и форсировки возбуждения [5]). Для реальной электрической сети число составляющих еще больше, так как она может содержать генераторы, отличающиеся типом, параметрами и удаленностью от точки короткого замыкания, различные виды нагрузок, синхронные компенсаторы и т. п. Поэтому точный учет всех составляющих в токе $i_{\Sigma}(t)$ осуществить практически невозможно. Для ис-

следования нагрева применяется эквивалентная схема сети, состоящая из системы бесконечной мощности и эквивалентного турбогенератора. Расчетным режимом в такой схеме будет трехфазное короткое замыкание, близкое к выводам генератора. Составляющая тока короткого замыкания от системы определяется по ЭДС системы и сопротивлению ее ветви. Периодический ток генератора представляется суммой сверхпереходного, переходного, периодического установившегося токов и током от действия автоматического регулирования возбуждения. При нахождении этого тока принимаются усредненные параметры турбогенератора, заимствованные из [5]. Аперриодический ток находится как эквивалентный от генератора и системы [5] с постоянной времени затухания 0,045 с. После подстановки численных значений параметров генератора расчетный ток короткого замыкания принимает вид

$$i_{\Sigma}(t) = I_m \left(1 \sin(\omega t + \pi/2) + \frac{1,407}{1 + \alpha_*} e^{-8,33t} \sin(\omega t + \pi/2) + \frac{0,676}{1 + \alpha_*} \times \right. \\ \left. \times e^{-1,75t} \sin(\omega t + \pi/2) + \frac{0,392}{1 + \alpha_*} e^{-0,833t} \sin(\omega t + \pi/2) + \frac{3,475 + \alpha_*}{1 + \alpha_*} e^{-22,2t} \right), \quad (9)$$

где $I_m = I_{mг} + I_{мс}$ – суммарная амплитуда периодического тока установившегося режима короткого замыкания от ветвей генератора $I_{mг}$ и системы $I_{мс}$;

$\alpha_* = I_{мс} / I_{mг}$ – отношение амплитуд периодических токов установившегося режима системы и генератора.

Ток переходного режима берется в относительных единицах. С варьированием амплитуды I_m изменяются именованные значения тока $i_{\Sigma}(t)$, плотности тока в (3), а значит, и степень нагрева шинпровода в переходном режиме. При этом соотношения между составляющими тока в (9) остаются неизменными. Для их изменения величина α_* принимается переменной. Выражения вида (9) можно получить и для других расчетных схем сети.

Для расчета распределения плотности тока в начальный момент короткого замыкания требуется также знать величину и закон изменения тока нормального режима. При исследовании нагрева будем исходить из того, что проводники в предшествующем режиме нагреты до 70 °С, а ток для каждого шинпровода находится как длительно допустимый при 70 °С.

Принятые расчетные токи переходного и предшествующего режимов позволяют проводить численные исследования нагрева многополосных шинпроводов при коротких замыканиях.

Исследование нагрева шинпроводов при коротких замыканиях. Влияние неравномерного распределения плотности тока на термический импульс можно оценить на основе исследования зависимостей коэффициента добавочных потерь во времени $K_d(t)$. На рис. 2 приведены такие зависимости для уединенной алюминиевой шины размерами 100 × 10 мм² при различных величинах тока (амплитуды I_m или средней амплитуды

плотности тока $\sigma_{\text{ср}} = I_m / ab$) и длительностях короткого замыкания. Коэффициент добавочных потерь (для уединенной шины он совпадает с коэффициентом поверхностного эффекта) в первые периоды переходного режима заметно меньше своего установившегося значения в нормальном режиме $K_{\text{дл}}$. Это совпадает с результатами [2, 3], полученными при неизменной проводимости. В дальнейшем коэффициент добавочных потерь уменьшается. Последнее связано с ростом температуры, снижением проводимости алюминия и, как следствие, выравниванием токораспределения. Причем, чем больше ток, тем сильнее снижается $K_{\text{д}}$ в переходном режиме.

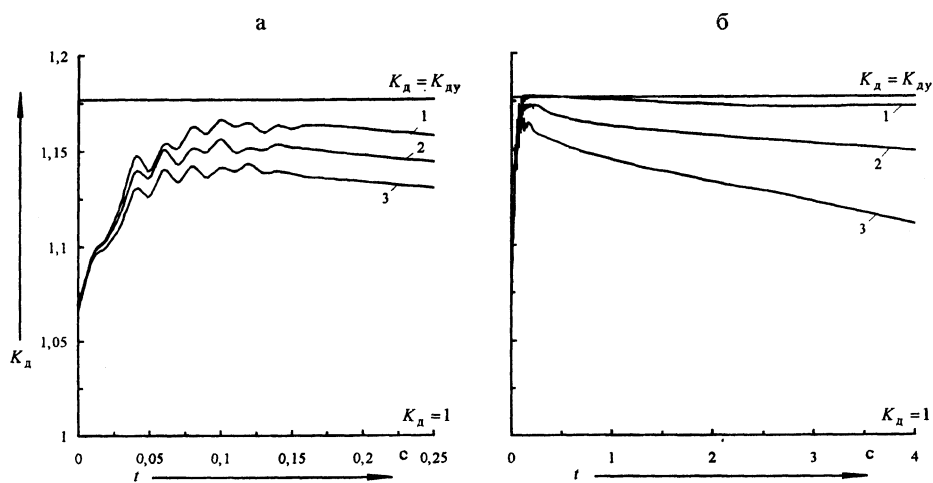


Рис. 2. Изменение коэффициента добавочных потерь прямоугольной шины в переходном режиме: а – $\alpha_* = 0$; $T_{\text{кз}} = 0,25$ с; 1 – $\sigma_{\text{ср}} = 60$ А/мм²; 2 – 80; 3 – 100; б – $\alpha_* = 0$; $T_{\text{кз}} = 4$ с; 1 – $\sigma_{\text{ср}} = 20$ А/мм²; 2 – 40; 3 – 60

Зависимости $K_{\text{д}}(t)$ позволяют качественно сравнить термические импульсы, рассчитываемые в допущении равномерного токораспределения ($K_{\text{д}} = 1$), с учетом реального распределения плотности тока и при $K_{\text{д}} = K_{\text{дл}}$. При равномерном распределении тока термический импульс занижен на величину, пропорциональную

$$\Delta A_{\text{кз}(K_{\text{д}}=1)} \sim \int_0^{T_{\text{кз}}} (K_{\text{д}}(t) - 1) dt, \quad (10)$$

а при введении в расчет $K_{\text{дл}}$ он, наоборот, завышен

$$\Delta A_{\text{кз}(K_{\text{д}}=K_{\text{дл}})} \sim \int_0^{T_{\text{кз}}} (K_{\text{дл}} - K_{\text{д}}(t)) dt. \quad (11)$$

Кривые рис. 2 показывают, что использование в расчетах $K_{\text{дл}}$ дает лучшие результаты, чем допущение о равномерном токораспределении,

так как $\Delta A_{кз(K_d=K_{дв})} < \Delta A_{кз(K_d=1)}$. Кроме того, данное допущение дает запас в термической стойкости. При достаточно больших токах величина $\Delta A_{кз(K_d=K_{дв})}$ может оказаться существенной, а получаемые таким образом температуры – завышенными.

Отмеченное указывает на необходимость исследования зависимости температуры шинопроводов от величин тока короткого замыкания и установления границ применимости рассмотренных выше допущений. При принятом токе короткого замыкания температура полос однозначно определяется амплитудой тока установившегося режима I_m и соотношением токов системы и генератора α . Поэтому при исследовании нагрева устанавливаются зависимости Θ именно от этих параметров. На рис. 3 приведены зависимости температуры уединенной шины и многополосных шинопроводов из алюминиевых полос размерами $100 \times 10 \text{ мм}^2$ от величины средней плотности тока в установившемся режиме $\sigma_{ср}$. Они позволяют по известным амплитуде установившегося тока короткого замыкания и отношению токов системы и генератора определять конечные температуры полос при средней длительности короткого замыкания 0,25 с (кривые 4–6) и длительности протекания тока термической стойкости 4 с (кривые 1–3).

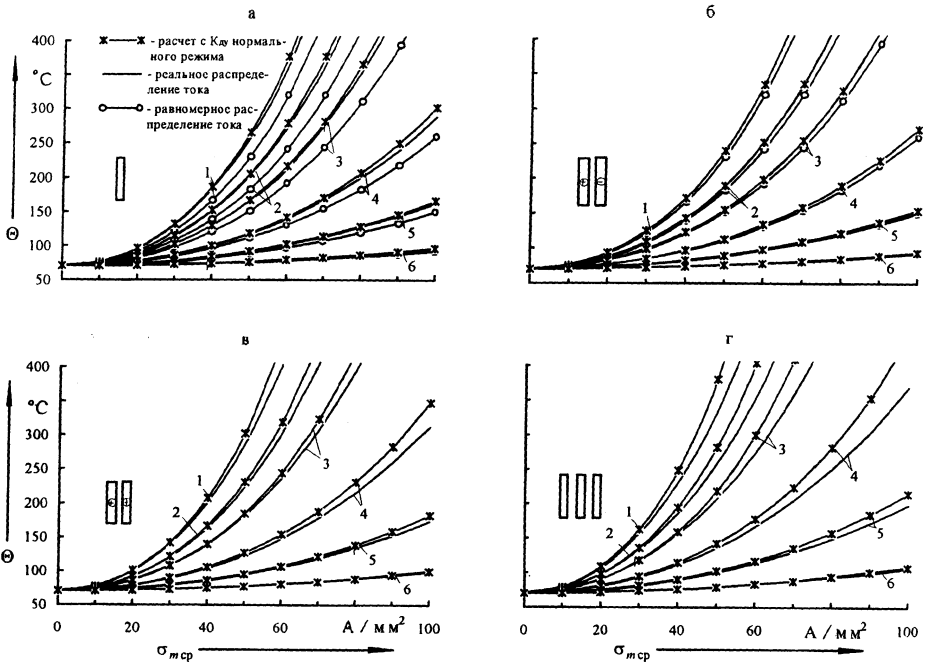


Рис. 3. Зависимости температуры многополосных шинопроводов от амплитуды средней плотности тока установившегося режима при различных значениях α и $T_{кз}$: 1 и 4 – $\alpha = 0$; 2 и 5 – 1; 3 и 6 – ∞ ; 1, 2, 3 – $T_{кз} = 4$ с; 4, 5, 6 – 0,25 с; а – уединенная полоса; б – однофазный шинопровод; в – двухполосный пакет; г – крайние полосы трехполосного пакета

В однофазном шинопроводе (двухполосный пакет с противоположными токами, рис. 3б) распределение плотности тока близко к равномерному

[3], поэтому зависимости $\Theta(\sigma_{\text{ср}})$ расположены ниже аналогичных зависимостей уединенного проводника. При одинаковых направлениях токов (рис. 3в) их плотность распределена, наоборот, более неравномерно, и кривые $\Theta(\sigma_{\text{ср}})$ лежат выше кривых уединенной полосы. В полом пакете эффект близости проявляется слабо и плотности тока в его полосах распределены практически так же, как в уединенной шине [3]. Поэтому зависимости температуры полос полого пакета практически совпадают с соответствующими зависимостями уединенного проводника и полученные для него результаты применимы и к полному пакету.

Рассмотренные шинопроводы (рис. 3б, в) являются симметричными, что позволяет проводить исследования только для одной полосы пакета. Несимметрия трехполосного пакета приводит к отличию как электромагнитных, так и тепловых параметров крайних и средней полос. Из-за неравенства токовых нагрузок полос температуры крайних и средней полос отличаются. В нормальном режиме температуры также не одинаковы. Это приводит к разным значениям удельных электрических проводимостей и теплоемкостей полос. Учет отмеченных особенностей значительно усложняет задачу исследования поля. Численные расчеты нагрева полос пакета при равенстве их проводимостей показали, что наиболее сильно нагреваются крайние полосы и максимальные отличия в температурах полос не превышают 40...60 °С. Проводимости при этом различаются на 10...15 %. В таком случае влияние неравенства проводимостей полос на интегральные характеристики распределения поля (коэффициент добавочных потерь) незначительно. Поэтому расчет нагрева трехполосных пакетов осуществлен при равенстве проводимостей полос.

Зависимости $\Theta(\sigma_{\text{ср}})$ трехполосного пакета (рис. 3г) приведены для крайних полос. Трехполосный шинопровод характеризуется наиболее неравномерным распределением плотности тока по сравнению с рассмотренными ранее пакетами [3], и поэтому зависимости $\Theta(\sigma_{\text{ср}})$ для него расположены выше предыдущих.

Приведенные на рис. 3 зависимости позволяют сравнить результаты, полученные с учетом реального распределения тока, при равномерном токораспределении и использовании в расчете $K_{\text{дв}}$. При малых конечных температурах (примерно до 120 °С) кривые, рассчитанные различными способами, практически совпадают. С ростом величины тока и возрастанием температуры начинают проявляться их отличия. Так, для уединенного проводника при Θ порядка 150 °С отличия в температурах, полученных с учетом реального распределения плотности тока и при $K_{\text{д}} = 1$, составляют до 15 °С; при 200 °С, что соответствует допустимой температуре для алюминия, – до 25 °С; при 300 – до 40; при 400 – до 55. По отношению к превышению температуры в переходном режиме $\Delta\Theta_{\text{кз}} = \Theta(T_{\text{кз}}) - \Theta(0)$ они составляют порядка 20 %. Аналогичные отличия в результатах, полученных с учетом реального токораспределения и при $K_{\text{д}} = K_{\text{дв}}$, соответственно равны: 150 °С – 4 °С; 200 – 7; 300 – 13; 400 – 20. В относительных единицах они возрастают с 5 % при 150 °С до 6 % при 400 °С.

Анализ полученных результатов показывает, что допущение о равномерном распределении плотности тока при расчете нагрева становится не-

приемлемым уже для уединенного проводника. Для пакетных шинопроводов, за исключением однофазных, занижения температуры будут еще большими. Следовательно, такое допущение можно принимать только при слабо выраженных явлениях поверхностного эффекта и эффекта близости (коэффициент добавочных потерь не должен превышать примерно 1,1). Так, для рассматриваемого однофазного шинопровода коэффициент добавочных потерь невелик ($K_{\text{д}} = 1,05$) и относительные отличия в температурах в этом случае не превышают 6 %. При использовании в расчетах коэффициента добавочных потерь нормального режима отличия совсем незначительны (не превышают 0,5 %).

Для двухполосных пакетов с одинаковыми направлениями токов расчет температуры с использованием $K_{\text{д}}$ приводит к заметным завышениям температуры. При температуре порядка 150 °С завышения составляют примерно 7 °С; 200 – 13; 300 – 26; 400 °С – 40 °С, или в относительных единицах от 9 % при 150 °С до 12 % при 400 °С.

Отличия в температурах, полученных с учетом реального токораспределения и при $K_{\text{д}} = K_{\text{д}0}$, еще больше возрастают для трехполосных пакетов. При 150 °С они составляют порядка 11 °С; 200 – 20; 300 – 46; 400 °С – 82 °С, а в относительных единицах отличия температур возрастают с 14 % при 150 °С до 25 % при 400 °С.

Проведенные исследования показывают, что чем более выражено неравномерное распределение плотности тока в полосах, тем интенсивнее они нагреваются. С увеличением коэффициента добавочных потерь возрастают ошибки в расчетных температурах нагрева, определяемых упрощенными способами. Поэтому при более точных расчетах необходимо учитывать как реальный характер распределения электромагнитного поля в переходном режиме, так и характер протекающего тока короткого замыкания.

Приведенные зависимости температуры получены применительно к шинопроводам с сечением полос $100 \times 10 \text{ мм}^2$. Аналогичные зависимости могут быть рассчитаны и для других сечений на основе рассмотренного метода или путем умножения кривых рис. 3 на отношение коэффициентов добавочных потерь полосы шинопровода и шины.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод расчета нагрева многополосных шинопроводов при коротких замыканиях, позволяющий исследовать характеристики нагрева проводников с учетом явлений поверхностного эффекта и эффекта близости в переходном режиме.

2. Численными исследованиями установлено, что равномерное распределение плотности тока применимо лишь при слабо выраженных поверхностном эффекте и эффекте близости, а использование в расчетах коэффициента добавочных потерь нормального режима дает завышенные значения температур. При значениях коэффициента добавочных потерь, превышающих 1,25...1,3, расчет нагрева необходимо проводить с учетом распределения электромагнитного поля в переходном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р у ц к и й А. И. Нагрев проводников при коротких замыканиях // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1968. – № 6. – С. 12–17.
2. Г е р а с и м о в и ч Д. А., Н о с а й р а т Ф а и з. Электромагнитные характеристики шины прямоугольного профиля в переходных режимах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 2. – С. 15–24.
3. Г е р а с и м о в и ч Д. А., Н о с а й р а т Ф а и з. Электромагнитные характеристики многополосных шинопроводов в переходных режимах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 1. – С. 18–25.
4. К и с с е л ь р и н г Ф. Теоретические основы расчета коммутационных аппаратов / Пер. с нем. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 152 с.
5. У л ь я н о в С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 31.07.2001

УДК 621.311:658.012.011.56

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ЦЕПЕЙ ОПЕРАТИВНОЙ БЛОКИРОВКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Инженеры ЦАРЕВ Б. П., БУРЛЮК В. В.

Республиканское унитарное предприятие «НИИ средств автоматизации»

Инж. СОЛОМОНИК А. И., канд. техн. наук ЯКОВЛЕВ Г. В.

Республиканское унитарное предприятие «Витебскэнерго»

Инж. РАДЮК В. Л.

Государственный энергетический концерн «Белэнерго»

В Белорусской энергосистеме имеется значительное количество подстанций и распределительных устройств электростанций, оснащенных коммутационными аппаратами (КА) (разъединители, отделители, заземляющие ножи), управление положением которых при переключениях осуществляется оперативным персоналом вручную или с помощью электропривода. Для обеспечения безопасных условий переключений и исключения ошибок персонала в конструкциях коммутационных аппаратов предусмотрены электрические (электромагнитные) и (или) механические блокировки, назначением которых является предотвращение:

отключения или включения тока нагрузки разъединителями и отделителями, за исключением случаев, определяемых ПУЭ [1];

включения выключателей и разъединителей на заземляющие ножи, т. е. подачи напряжения на заземленный участок цепи или заземленные сборные шины;